

О БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ СВЧ ДИАГНОСТИКЕ СИЛЬНОПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД

Гайкович К.П.^{1,2}, Максимович Е.С.³

¹ Институт физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

E-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

³ Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск

В работе анализируются возможности создания системы многочастотной СВЧ диагностики диэлектрических неоднородностей в средах с сильным поглощением. Исследуемый подход использует опыт создания аналогичной системы зондирования сред с относительно слабым поглощением. Созданные для этой системы алгоритмы томографии и голографии подповерхностных неоднородностей, которые основаны на решении обратной задачи ближнеполюсного рассеяния, модифицируются в применении к новым параметрам системы и диэлектрическим параметрам сильнопоглощающих сред и исследуются в численном моделировании.

Введение

Задача томографии, то есть получения трехмерного (3D) распределения диэлектрической проницаемости в среде с подповерхностной неоднородностью, в данном случае состоит в решении обратной задачи рассеяния на основе использования данных многочастотных СВЧ измерений поля, рассеянного диэлектрическими объектами на глубине порядка размеров ближнего поля для наибольшей длины волны частотного диапазона зондирующего сигнала. Ближнеполюсные измерения привлекают возможностью выхода за релейское ограничение разрешающей способности, что является единственным способом, когда переход к более коротковолновому диапазону невозможен из-за возрастания ослабления в среде.

В данной работе развивается подход к ближнеполюсной сканирующей томографии [1], основанный на схеме измерений, предложенной в [2], в которой измерения в двумерной области над неоднородностью выполняются с помощью жестко связанной системы источник-приемник. Глубинную чувствительность обеспечивают измерения в зависимости от третьего параметра, такого, как частота сигнала, размер апертуры приемной антенны или высота уровня сканирования. Такая схема приводит 3D уравнение в борновском приближении к уравнению типа свертки, редуцируемому к одномерному интегральному уравнению, которое должно решаться для каждой пары волновых чисел двумерного поперечного спектра. Более того, этот подход позволяет получать и некоторую коррекцию к решению в борновском приближении. Поперечные спектры функций Грина, образующие ядро решаемого уравнения были получены в [2] в явном виде. Там же был апробирован и метод решения таких уравнений Фредгольма 1-го рода для комплекснозначных функций в пространстве Соболева W_2^1 , основанный на принципе обобщенной невязки.

Следует отметить, что для сплошных, внутренне однородных, объектов, которые на практике встречаются значительно чаще распределенных неоднородностей, исчерпывающей характеристикой является геометрическая форма поверхности, однако ее получение (задача компьютерной голографии) на основе результатов решения описанной более общей задачи томографии не является тривиальной задачей. Математически последовательный подход к задаче голографии таких объектов и первые результаты также были получены в [3]. До некоторой степени аналогичные подходы в настоящее время развиваются также с целью получения радиоголографических изображений поверхности металлических неоднородностей [4].

Описанные подходы были реализованы в эксперименте для подповерхностной СВЧ томографии неоднородностей в грунте [3], где были получены хорошие результаты томографии распределенных и сплошных тестовых неоднородностей в средах с относительно небольшими значениями диэлектрических параметров, таких, как обычные виды грунта. Среди возможных применений этой методики весьма важными представляются медико-биологические приложения, но непосредственной применением описанной в [3] системы для этой цели оказывается невозможным. Причиной является тот факт, что диэлектрические параметры живых тканей благодаря содержанию в них воды имеют существенно большие значения, что приводит к сильному поглощению волн в диапазоне работы

системы [3] (1 – 7 ГГц) и сильному отражению от их поверхности. В данной работе на основе численного моделирования рассматриваются возможные изменения параметров системы, которые позволили бы применить развитые алгоритмы для медико-биологической диагностики.

Теория

Для рассматриваемой схемы вариации комплексных амплитуд принимаемого сигнала s , связанные с неоднородностью, выражаются сверткой аппаратной функции приемника \mathbf{F} с распределением рассеянного поля \mathbf{E}_1 :

$$s_1(\mathbf{r}_r) = \int \mathbf{E}_1(\mathbf{r}') \mathbf{F}(x_r - x', y_r - y', z_r, z') dx' dy' dz', \quad (1)$$

где \mathbf{r}_r – вектор, определяющий положение приемника. Выполняя двумерное преобразование Фурье по поперечным координатам x_r и y_r , получаем одномерное интегральное уравнение для поперечных спектров сигнала, измеряемого при сканировании на уровне z_r , ядро которого согласно [2] выражается через компоненты поперечного тока j и функций Грина G_{ij}^{12}, G_{ij}^{21} для волн, распространяющихся из среды 1 в среду 2 и обратно:

$$s_1(k_x, k_y, \omega) = \int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') K(k_x, k_y, z', \omega) dz, \quad (2)$$

$$K(k_x, k_y, z', \omega) = -4\pi^3 i \omega \int_z \{ F_i(k_x, k_y, z, \omega) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x \delta x - ik_y \delta y} \times \int_{z''} [j_i(\kappa_x, \kappa_y, z'' - z - \delta z, \omega) G_{ij}^{12}(\kappa_x, \kappa_y, z'', z', \omega)] G_{ji}^{21}(\kappa_x + k_x, \kappa_y + k_y, z', z, \omega) d\kappa_x d\kappa_y dz'' \} dz.$$

Однако оказалось трудно использовать это уравнение для интерпретации экспериментальных данных непосредственно. В экспериментах с этой многочастотной системой СВЧ томографии [3] оказалось трудно различить подповерхностный объект на визуализированных изображениях измеряемого двумерного распределения сигнала $s(x, y, \omega)$ на фоне сильного шума, обусловленного, как выяснилось, рассеянием от поверхности. Но было установлено, что подповерхностные объекты становятся отчетливо различимы при визуализации сигнала, трансформированного обратным фурье-преобразованием в синтезированный псевдоимпульс [3]. Сильный максимум псевдоимпульса, наблюдаемый во всей двумерной области измерений (x_r, y_r) соответствовал положению поверхности на временной шкале, а в некотором ее интервале наблюдался отклик от объекта, который в отличие сигнала от поверхности был локализован не во всей области измерений, а только в некоторой ее части над объектом. Чтобы использовать информативную часть сигнала, выделяемую в псевдоимпульсе, при решении обратной задачи исходное уравнение (2) было трансформировано аналогичным образом. В результате было получено новое уравнение, которым ядро заменяется на его фурье-преобразование, и это уравнение, как и исходное, является интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода

$$s_1(k_x, k_y, z_s) = \int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') K_1(k_x, k_y, z', z_s) dz', \quad (3)$$

$$K_1(k_x, k_y, z', z_s) = K_1(k_x, k_y, z', t = -2z_s \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon_0} / c), K_1(k_x, k_y, z', t) = \int_{\Delta\omega} K(k_x, k_y, z', \omega) \exp(i\omega t) d\omega,$$

где $\Delta\omega$ - полоса анализа. В (3) для удобства интерпретации вместо временного параметра вводится параметр эффективной глубины рассеивающего элемента z_s с учетом скорости распространения в среде до элемента и обратно.

Для решения (3) использовался алгоритм метода обобщенной невязки для комплекснозначных функций, развитый в [2]. В результате из решения в k -пространстве задачи (3) путем обратного фурье-преобразования получается решение задачи томографии – искомая трехмерная структура комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_1(x, y, z) = \iint \varepsilon_1(k_x, k_y, z) \exp(ik_x x + ik_y y) dk_x dk_y. \quad (4)$$

На практике различного рода подповерхностные неоднородности чаще всего сами бывают внутренне однородными, и для таких объектов достаточно решить более простую задачу

восстановления формы их поверхности, т.е. задачу компьютерной голографии. Если *a priori* известно, что диэлектрическая проницаемость объекта постоянна, т.е. $\varepsilon_1^0 = const$, то задача томографии может быть редуцирована к задаче восстановления числовой формы объекта [3], используя полученное из (3) решение задачи томографии $\varepsilon_1(k_x, k_y, z)$ в k -пространстве виде двух функций $y_1(x, z)$, $y_2(x, z)$ из решения комплексного трансцендентного уравнения:

$$\varepsilon_1(k_y, x, z) = \frac{\varepsilon_1^0}{2\pi i k_y} (e^{-ik_y y_1(x, z)} - e^{-ik_y y_2(x, z)}), \quad (5)$$

$$\varepsilon_1(k_y, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_1(k_x, k_y, z) \exp(ik_x y) dk_x,$$

которое эквивалентно системе двух реальных уравнений, что и позволяет получить из его решения форму. Следует отметить, что эта система является переопределенной, поскольку решение может быть получено для каждого значения k_y .

В экспериментах [3] использовалась сканирующая система многочастотного зондирования, позволяющая осуществлять измерять комплексные амплитуды сигнала на 801 частоте в диапазоне 1,7 – 7 ГГц, с приемно-передающей системой из двух идентичных bow-tie антенн, имеющих широкий пространственный спектр передаточной функции. С ее использованием оказалось возможным получить томографические и голографические изображения субволнового разрешения диэлектрических объектов в слабо поглощающих средах, таких, как песчаный грунт, до глубин около 10 см. Среди возможных применений этой методики весьма важным представляются медико-биологические приложения. Однако живые ткани, как правило, характеризуются большими значениями комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне описанной выше системы. Это приводит к сильному затуханию зондирующего поля и рассогласованию антенной системы со средой. Как следствие, в наших экспериментах с образцами сала в такой среде [5] показали, что такие объекты становятся практически неразличимы на глубинах более 0,5 – 1 см.

Поэтому цель данной работы состояла в исследовании возможностей модификации параметров системы, пригодных для диагностики неоднородностей в таких средах. Очевидным способом такой модификации является перенос измерений в более низкочастотный диапазон для увеличения глубины проникновения зондирующего поля. Также, имея в виду важность применения методики на небольшом пространстве и для довольно малых неоднородностей в медицинской диагностике опухолей, имеется необходимость соответствующего уменьшения размеров антенной системы.

Результаты численного моделирования

Численные эксперименты были выполнены для системы, работающей в диапазоне 200-600 МГц с приемно-передающей системой, использующих идентичные антенны с размерами $1,5 \times 1,5 \text{ см}^2$ и расстоянием между их центрами 2 см. В этом диапазоне толщина скин слоя в такой среде меняется примерно от 2 до 6 см. Проблемой безусловно является необходимость использования антенн достаточно малых размеров, что радикально уменьшает их эффективность.

На рис.1,2 показаны результаты численного моделирования метода томографии для неоднородности, имеющей форму параллелепипеда размером $0,5 \times 1 \times 0,5 \text{ см}^3$ с $\varepsilon = 43 + 18i$, основанного на решении (3), в среде с $\varepsilon = 40 + 15i$ для двух значений его глубины: на рис.1 для глубины 1 см, а на рис.2 – для глубины 4 см. Можно видеть, что на изображениях синтезированного псевдоимпульса (рис.1b, 2b) объект виден в области эффективных глубин рассеяния z_s , примерно соответствующих реальному глубинному положению объекта. Это открывает возможность существенного сужения области, где ищется решение обратной задачи рассеяния, что весьма важно в некорректных задачах, основанных на решении уравнений Фредгольма 1-го рода. На изображениях псевдоимпульса есть и более слабо выраженные детали, не ассоциируемые с объектом.

Результаты томографического анализа (рис.1c, 2c), основанные на решении (3) по данным с наброшенной случайной нормально распределенной ошибкой со среднеквадратичным отклонением в 5%, демонстрируют хорошую воспроизводимость положения и формы объекта. Однако, если для объекта на глубине 1 см восстановленное значение диэлектрической проницаемости в максимуме отличается от заданного примерно на 10%, то при его глубине 3 см ошибка составляет около 30%.

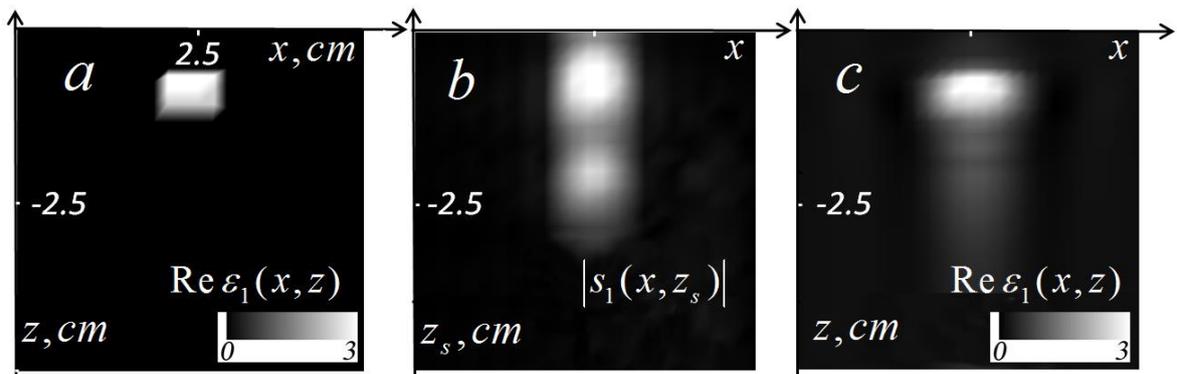


Рис.1. Моделирование метода томографии для объекта на глубине 1 см. а) исходное распределение диэлектрической проницаемости в вертикальном сечении через центр объекта по оси y ; б) распределение амплитуды псевдоимпульса в зависимости от параметра эффективной глубины рассеяния z_s ; в) восстановленное распределения диэлектрической проницаемости в вертикальном сечении (томограмма).

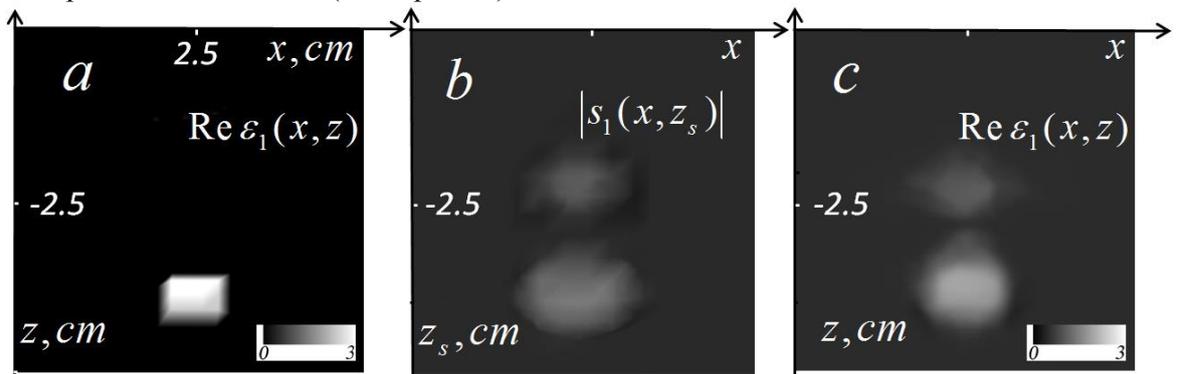


Рис.2. Моделирование томографии объекта на глубине 3 см. Обозначения аналогичны рис.2.

На томограммах (рис.1с, 2с) так же, как и на изображениях псевдоимпульса можно заметить артефакты, но они являются менее выраженными. Существенно более отчетливо объект различим на голограммах (рис.3), полученных из решения (5), что возможно связано с введением дополнительной информации о постоянстве его диэлектрической проницаемости. Можно отметить, что с ростом глубины происходит расплывание формы объекта, но в целом достигнутое качество диагностики можно считать приемлемом для рассматриваемых приложений.

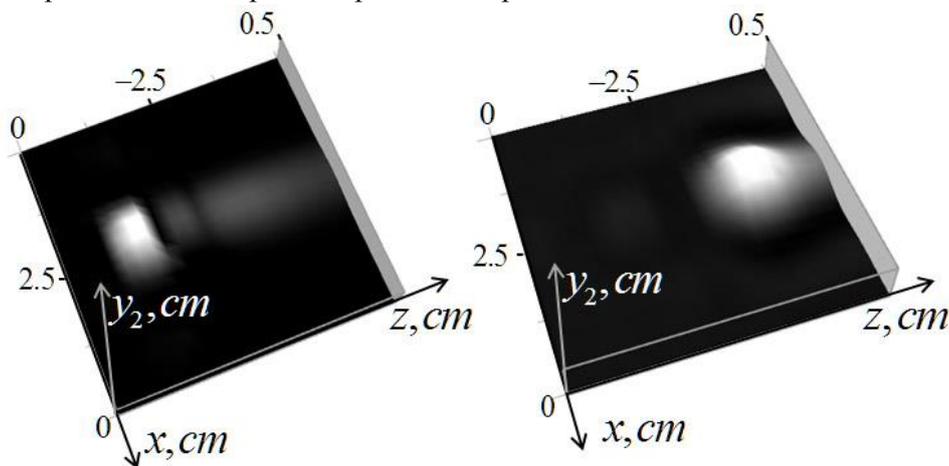


Рис.3. Моделирование метода голографии. Слева – голографическое изображение половины моделируемого объекта, расположенного на глубине 1 см, функцией $y_2(x,z)$; справа – голографическое изображение объекта на глубине 3 см.

Несмотря на продемонстрированные возможности решения обратной задачи, серьезной проблемой является создание системы, обеспечивающей измеримость рассеянного поля с необходимым уровнем точности.

Были выполнены исследования формирования зондирующего поля в описанной выше среде с применением антенны bow-tie типа с размерами $1,9 \times 2,8 \text{ см}^2$. Оказалось, что для обеспечения различимости исследованного выше объекта измерения необходимо выполнять в согласованной по диэлектрическим параметрам среде. На рис. 4 представлены вычисленные распределения амплитуд полного и рассеянного полей на частоте 200 МГц в плоскости x - z такой излучающей антенны для объекта с $\varepsilon = 30+5i$ в форме параллелепипеда с такими же размерами, как на рис.1,2 и на тех же глубинах 1 и 3 см.

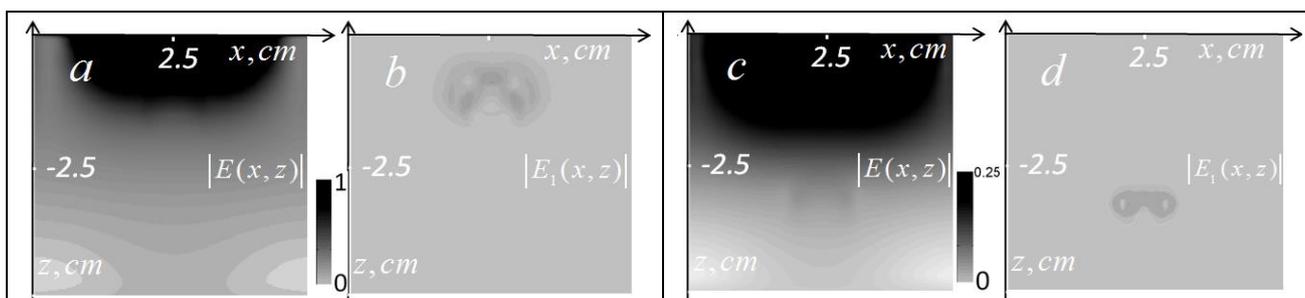


Рис.4. Слева – распределение полного поля (a) и рассеянного поля (b) для объекта на глубине 1 см. Справа – полное (c) и рассеянное (d) поля для объекта на глубине 3 см.

Масштаб в рис.4a,b нормирован на амплитуду поля, соответствующему началу сплошной черной зоны на рис.4a, а на рис. 4c,d – на четверть этой величины. Ближе к антеннам поле существенно возрастает. Видно, что объект проявляется в распределениях полного поля на рис.4a,c как слабоконтрастный, что позволяет использовать описанные выше методы решения обратной задачи. Но, с другой стороны, рассеянное поле (рис.4b,d) возможность его выделения на фоне сильного сигнала вблизи излучающей антенны остается проблемой, которую нужно разрешить на основе экспериментальных исследований. В части анализа задача состоит в оптимизации выбора частотного диапазона и параметров антенн с учетом конкретных свойств сильно поглощающей среды на основе расчетов распределений поля, подобных представленным на рис.4.

Благодарности

Исследования были выполнены при поддержке РФФИ, проекты № 12-02-90028-Be1, 13-07-97028_p_поволжье, БРФФИ № Т12Р-133, а также программы ОФН РАН IV.13, а также частично поддержаны грантом Минобрнауки РФ (соглашение от 27 августа 2013г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Gaikovich K.P. Subsurface Near-Field Scanning Tomography // Physical Review Letters, vol. 98, no. 18, pp. 183902 (1-4), 2007.
2. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media // Inverse Problems, vol. 26, no. 12, pp. 125013 (1-17 pp.), 2010.
3. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye.S., Badeev V.A. Pseudopulse near-field subsurface tomography // Physical Review Letters, 2012, v. 108, No.16, p. 163902 (1-5 pp.).
4. Razevig V. V., Ivashov S. I., Sheyko A. P., Vasiliev I. A., Zhuravlev A. V. An example of holographic radar using at restoration works of historical building // Progress in Electromagnetic Research Letters. 2008, v.1, pp 173-179.
5. Gaikovich K.P., Maksimovitch Ye.S., and Badeev V.A., Multifrequency diagnostics of inhomogeneous media // Proc. 9th Int. Conf. on Antenna Theory and Technique” (ICATT’2013, September 16-20, 2013 – Odessa, Ukraine), Odessa: IEEE, 2013, pp. 140-142.